

Análisis del efecto del ruido en recepción de redes WDM con detección coherente¹

Analysis of the effect of noise on receipt of WDM networks with coherent detection

A. Toledo, G. López y G. Agredo

Recibido Septiembre 10 de 2012 - Aceptado Noviembre 15 de 2013

Resumen - La detección coherente como técnica de recepción, consiste en combinar la señal óptica incidente con una señal producida por un oscilador local a determinada frecuencia. El presente artículo analiza el efecto del ruido lineal y las distorsiones por las no linealidades, con el fin de proponer soluciones que mitiguen este efecto.

Palabras clave - efectos lineales, efectos no lineales, formatos de modulación, detectores ópticos coherentes, heterodino, WDM, ruido.

Abstract - Coherent detection as a reception technique consists on combining the incident optical signal to a signal produced by a local oscillator to a certain frequency. This article analyzes the effect of linear noise and the distortions due to nonlinearities, in order to propose solutions to mitigate this effect.

Key Words - linear effects, non-linear effects, modulation formats, coherent optical detectors, heterodyne, WDM, noise.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años la detección coherente ha adquirido fuerza como solución al problema de sensibilidad en

el receptor en enlaces de alta velocidad (10Gbps, 40Gbps, 100Gbps). Algunas investigaciones sobre detección coherente se han centrado en el análisis individual de los efectos del ruido presente en sistemas modulados en fase, asociándose este “efecto del ruido” a la degradación de la señal a nivel físico (deformación de los bits, pérdida de bits, interferencia inter-simbólica, entre otros). Debido a esto, cobra importancia el análisis de los efectos “que se presentan en un mismo instante” por ruidos en estos sistemas, además de verificar si existe un compromiso entre los mismos, para así poder controlar la degradación de la señal recibida de forma más efectiva. El análisis de los efectos del ruido se hizo concretamente para dos formatos de modulación (NRZ-OOK y NRZ-DPSK) y para detectores ópticos coherentes heterodinios.

Finalmente, uno de los objetivos de esta investigación se enmarcó en verificar cuál es el efecto que genera la presencia

de diversos tipos de ruido sobre una red WDM que utiliza detección coherente con receptores ópticos heterodinios y cuáles podrían ser las posibles soluciones para mitigar dicho efecto.

II. DESARROLLO DEL ARTÍCULO

Cuando se estudia el desempeño en recepción, para los sistemas ópticos, se debe tener en cuenta que existen dos tipos de detección: la directa y la coherente.

La detección directa, asociada a la modulación de intensidad (IM, *Intensity Modulation*), ha sido, hasta ahora, la combinación más usada en el ámbito comercial en los sistemas ópticos por su facilidad de implementación [1]. Consiste en recibir la señal óptica a través de un fotodetector, hacer la conversión optoelectrónica, y posteriormente procesar la señal electrónicamente para ser demodulada y demultiplexada [1].

¹ Producto derivado del proyecto de Investigación “Mejora en las Capacidades de Transmisión en Redes WDM, Metropolitanas, a 10 Gbps”, apoyado por la Universidad del Cauca a través del grupo de I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones y la Maestría en Electrónica y Telecomunicaciones.

A. Toledo, G. López y G. Agredo son Docentes Titulares adscritos al Departamento de Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca, Cl 5 # 4 -70 B/Centro, Popoyán (correos e.: atoledo@unicauca.edu.co, glopez@unicauca.edu.co, gagredo@unicauca.edu.co).

La detección coherente [2] consiste en combinar la señal de luz incidente con una señal de luz producida por un Oscilador Local (OL) situado en el receptor. Esto hace que se presente en el receptor una señal con una frecuencia intermedia W_{IF} igual a la diferencia entre las frecuencias de estas dos señales.

Dependiendo del valor de la frecuencia intermedia de la señal, se habla de dos tipos diferentes de receptores coherentes: **Receptores homodinos:** en estos receptores la frecuencia de la señal de luz producida por el Oscilador Local es igual a la frecuencia de la señal incidente, lo cual genera una frecuencia intermedia igual a cero. Este tipo de receptores presentan un buen desempeño, pero son muy difíciles de implementar debido a que, para lograr la condición de frecuencia intermedia cero, deben hacer una malla óptica de fase cerrada PLL para hacer seguimiento de fase. Si no se hace esto, es necesario de todas formas tratar la señal óptica para poder contrarrestar los efectos producidos por el comportamiento aleatorio de la fase. Esta manipulación de la señal óptica es muy difícil de implementar, lo cual hace que estos tipos de receptores sean poco comunes comercialmente.

Receptores heterodinos: en estos receptores la frecuencia del Oscilador Local es diferente de la de la señal incidente, generando una frecuencia intermedia distinta de cero; cabe aclarar que todos los receptores heterodinos son receptores coherentes.

La diferencia en desempeño entre los receptores homodinos y heterodinos no es muy grande, quedando este último a lo sumo 3dB por debajo. Sin embargo son mucho más fáciles de implementar porque el seguimiento de fase se puede hacer electrónicamente con mallas de fase cerrada PLL basadas en la teoría tradicional del procesamiento digital de señales. Por otro lado, cuando no se hace seguimiento de fase, el tratamiento de la señal incidente para contrarrestar el comportamiento aleatorio de la fase se hace mediante circuitos electrónicos, siendo mucho más fácil su implementación. [1], [3], [4].

Con el fin de analizar el efecto del ruido en redes WDM cuando se utiliza detección coherente heterodina, se construyó un modelo simplificado de red, en el cual se midieron algunos parámetros de la red que permitieron identificar el desempeño del sistema bajo ciertas condiciones de transmisión y del enlace de fibra.

Para poder identificar los efectos del ruido en recepción para redes WDM, fue necesario tener en cuenta características de red que combinaran tres criterios:

- Debería tener algunas características comunes de las redes WDM comerciales, ya que éstas se han impuesto sobre otras porque generan mejor desempeño de los sistemas, y permiten resolver nuevos problemas en términos del efecto del ruido y de la distorsión de la señal.

- Deberían variarse algunas características comunes para generar condiciones poco favorables, donde fuera posible presenciar los efectos del ruido, las razones por las que se generan y los parámetros a variar en recepción para poder mitigar dichos efectos.

- Debería lograrse la mitigación de los efectos que no generan ruido, pero que distorsionan la señal, ya que esto no permite verificar los efectos de los ruidos en recepción.

Para la construcción del modelo simplificado de red, se tuvo en cuenta [5], en el cual se estableció un modelo basado en las características de redes en un contexto general y regido por las recomendaciones UIT-T [6], [7], [8], el cual puede apreciarse en la Fig. 1.

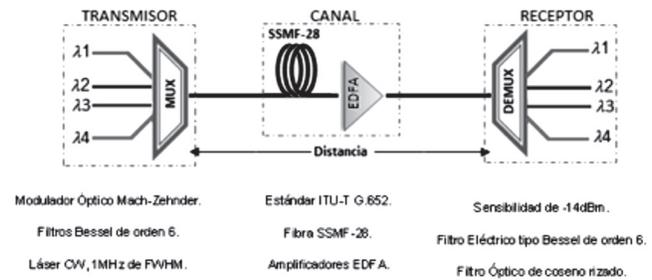


Fig. 1. Esquema general del escenario de simulación

Dependiendo del tipo de receptor, el esquema de modulación y los elementos que componen el sistema en recepción, existe una gran cantidad de fuentes de ruido que afectan la señal, dominando unos tipos de ruido sobre los otros según las condiciones mencionadas. Dentro los ruidos más importantes se consideraron: el ruido de fase del láser, el ruido inducido por dispersión, el ruido de fase no lineal inducido por SPM y el ruido de fase no lineal inducido por XPM. [9], [10].

III. EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DEL RUIDO EN LAS REDES WDM CON DETECCIÓN COHERENTE HETERODINA

Como se mencionó anteriormente, se creó un escenario general de simulación (realizada en la herramienta de simulación para comunicaciones ópticas – Optsim de SYNOPSIS²), en el cual se establecieron dos configuraciones: (una para NRZ-OOK y la otra para NRZ-DPSK) con diferente número de canales (8, 16 y 32 canales).

Para evaluar el efecto de los ruidos en las dos configuraciones y teniendo en cuenta los ruidos seleccionados, se determinan como parámetros a variar los siguientes: en el transmisor, se varió el formato de modulación de la señal y el número de canales implementados; en el canal, se varió el nivel de compensación de dispersión cromática, la longitud del span y el número de amplificadores EDFA a utilizar; en el receptor. El tipo de receptor estuvo acorde con el formato

²<http://optics.synopsys.com/rsoft/rsoft-system-network-optsim.html>

de modulación definido en el transmisor. También, con el fin de evaluar los resultados obtenidos se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros de desempeño: BER: $<10^{-9}$ (teórico), utilizado alrededor de 10^{-16} ; Factor Q: 6dB (teórico), utilizado alrededor de 20dB y Sensibilidad del Receptor: mínimo de -14dBm.

A. Evaluación de los efectos del ruido para NRZ-OOK

Para observar los efectos de la dispersión en el formato de modulación NRZ-OOK con Receptor Heterodino ASK Asíncrono, se varió la compensación dispersión, esto afecta la señal en todos los casos en donde no se hace compensación del 100%, colocando la BER y el factor Q por debajo de las referencias definidas en las recomendaciones de la ITU-T, como se muestra en la Fig. 2.

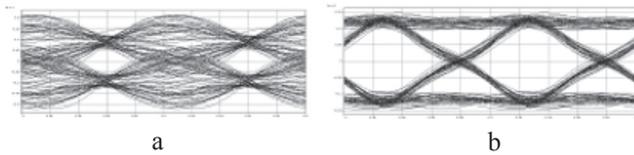


Fig. 2. Sistema NRZ-OOK con 8 canales, 7 spans y: a) Compensación del 70% de la CD. b) Compensación del 100% de la CD

Para evaluar el efecto del ruido de fase del láser, se realizaron variaciones de un parámetro del láser llamado FWHM, pero los resultados obtenidos en la simulación no tuvieron relevancia, no hubo cambios significativos en los valores de los parámetros de desempeño y los diagramas del ojo obtenidos no tuvieron mayores cambios para todos los escenarios de simulación, llevando a concluir que el efecto del ruido de fase del láser es irrelevante frente a los efectos de otros ruidos presentes en recepción. Por otro lado, para observar los efectos del ruido de amplificación, se varió el número de spans para los diferentes grupos de canales implementados, ya que con el aumento del número de span, se incrementa el número de amplificadores y por tanto, en teoría, debe incrementarse el ruido de amplificación; los resultados obtenidos cuando se utiliza 8 canales con una compensación del 100% de la CD, Fig. 3.

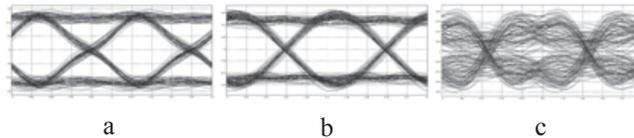


Fig. 3. Sistema NRZ-OOK con 8 canales y: a) 7 span de 80km. b) 6 span de 90km. c) 5 span de 100Kkm.

TABLA I.

RESULTADOS DE LA VARIACIÓN DE SPAN EN ENLACE DE 8 CANALES, CON UNA COMPENSACIÓN DEL 100%.

	7 Span de 80 km	6 Span de 90 km	5 Span de 100 km
BER	2,169200E-36	4,661170E-32	3,773600E-03
Factor Q dB	22,108318	21,386357	8,564157
OSNR	51.60	52.18	51.05

El diagrama del ojo de la Fig. 3 y la Tabla 1 muestran que para el caso de 5 span el efecto de la atenuación es bastante elevado y deteriora la señal, mostrando que los cambios en la longitud del span tienen un efecto más fuerte sobre el sistema que los cambios en la longitud del enlace (con 7 y 6 span se alcanzan distancias más largas del enlace que con 5 span).

Esto demuestra que el ruido de amplificación, que afecta a los sistemas a medida que se incrementa el número de span y, por tanto, el número de amplificadores, no genera mayores efectos sobre el sistema, como si lo hace la atenuación. Este mismo comportamiento se pudo apreciar para 16 y 32 canales. Por otro lado los diagramas muestran que, a pesar de que la BER para 6 y 7 span es muy baja, la coincidencia de unos y ceros no es perfecta, y se ven pequeños desfases aleatorios que harían pensar en la presencia de ruido de fase, que al haberse descartado ya que sea producido por el láser, podría decirse que es inducido por efectos no lineales de la fibra, como la SPM y la XPM.

Para verificar los resultados de simulación y observar los efectos que tiene el aumento de canales en la señal, y para modulación NRZ-OOK, se construyeron y configuraron enlaces de 8, 16 y 32 canales, obteniendo como resultado que el deterioro de la señal aumenta cuando hay un incremento en el número de los mismos, lo cual se hace crítico con 32 canales, ya que la señal alcanza una BER del orden de 10^{-9} que es el mínimo de referencia, pero es muy alta comparada con los otros casos que baja al orden de 10^{-32} y 10^{-27} . La caída de desempeño cuando se aumenta el número de canales y la forma de los diagramas del ojo, donde se ven pequeños desfases aleatorios, demostrando la presencia de ruido de fase inducido por XPM. Esto lleva a que con 32 canales el desempeño en todos los casos sea muy bajo en comparación con las demás configuraciones.

B. Evaluación de los efectos del ruido para NRZ-DPSK

Para el formato de modulación NRZ-DPSK con Receptor Heterodino DPSK Asíncrono se varió la compensación de la dispersión, obteniendo el resultado que se aprecia en la Fig. 4.

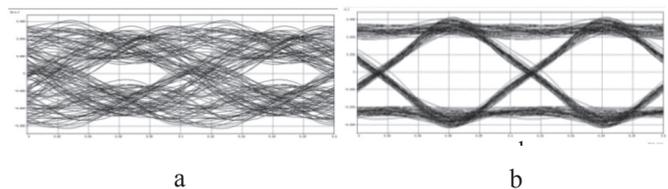


Fig. 4. Sistema NRZ-DPSK con 8 canales, 7 span y: a) Compensación del 70% de la CD. b) Compensación del 100% de la CD

Al igual que en el sistema NRZ-OOK, a una velocidad de 10Gbps la dispersión cromática afecta profundamente el desempeño del sistema, obligando a que se haga una compensación del 100% de la dispersión para que exista la posibilidad de alcanzar un buen comportamiento de los parámetros de desempeño.

Por otro lado, para observar los efectos del ruido de amplificación, se varía el número de span para los diferentes grupos de canales implementados, ya que con el aumento del número de span, se incrementa el número de amplificadores y por tanto, en teoría, debe incrementarse el ruido de amplificación; los resultados obtenidos cuando se utilizaron 8 canales con una compensación del 100% de la CD fueron los que se aprecian en la Fig. 5 y la Tabla 2.

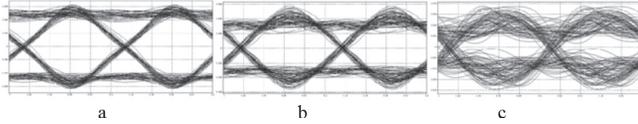


Fig. 5. Sistema NRZ-DPSK con 8 canales y: a) 7 spans de 80km. b) 6 spans de 90km. c) 5 spans de 100Km

TABLA II.
RESULTADOS DE LA VARIACIÓN DE SPANS EN
ENLACE DE 8 CANALES.

	7 Span de 80 km	6 Span de 90 km	5 Span de 100 km
BER	4,400087E-39	1,039090E-22	2,144000E-04
Factor Q dB	22,532800	19,848014	10,928800
OSNR	51,65	51,62	51,3

De acuerdo con [11], los diagramas del ojo muestran una fuerte influencia de la atenuación cuando se utilizan 5 span (mayor longitud del span, menor longitud del enlace), aunque en este caso el efecto de la atenuación no es de la misma magnitud que en el caso en que se usó modulación NRZ-OOK de la sección anterior. Este mismo comportamiento se puede apreciar para 16 y 32 canales.

Comparando estos resultados con los obtenidos para NRZ-OOK, se puede ver que el sistema NRZ-DPSK es mucho más sensible a los cambios en la longitud del span, pero con el valor apropiado para esta longitud, se alcanza mejor desempeño que cuando se utiliza NRZ-OOK. Por otro lado, el aumento del número de canales no afecta el desempeño del sistema NRZ-DPSK tanto como lo hace con NRZ-OOK, aunque no se alcanzan los valores mínimos para los parámetros de desempeño, la señal NRZ-DPSK no se deteriora tanto como la señal NRZ-OOK, lo que muestra menor sensibilidad al aumento de canales

Por último se observó que los diagramas del ojo de las señales NRZ-DPSK, en las condiciones más convenientes, son mejores que los de las señales NRZ-OOK, pero cuando se cambian algunos parámetros, principalmente la longitud del span, los diagramas de las señales NRZ-DPSK dejan de ser mejores, y muestran ciertos cambios de la fase, lo cual evidencia que los ruidos no lineales de fase inducidos por efectos no lineales afectan la señal NRZ-DPSK. Por esta razón se realizaron simulaciones bajo ciertas condiciones para detectar la presencia de efectos no lineales en el sistema, en concreto de la SPM; al igual que en el sistema NRZ-OOK, aquí se puede concluir que la presencia de un desfase de la señal que la deteriora a medida que aumenta

el número de canales, se debe a la presencia de ruido de fase no lineal inducido por XPM.

Para detectar si la XPM y la SPM generaban algún efecto, se consideró el enlace de 16 canales con 1 span de 80 km, tasa de transmisión de 10Gbps y amplificadores EDFA de ganancia a 3dBm, tanto para el formato de modulación NRZ-OOK como el de NRZ-PSK, ya que ésta configuración presentó un aceptable rendimiento, que dará una visión más real de los efectos que la SPM generan en la señal. El objetivo principal fue el de corroborar que los efectos no lineales de la fibra SPM y la XPM inducen ruido no lineal de fase, y verificar su efecto sobre la señal, pero ésta vez (y sólo en ésta sección) de manera aislada de los demás ruidos.

Para observar los efectos de la XPM se implementó un enlace de 16 canales donde se intercalaron potencias de 0dBm, a -10dBm y se varió la dispersión de 0 CD a 17 CD, tanto para el enlace NRZ-OOK como para NRZ-DPSK, obteniendo los siguientes resultados:

- Para NRZ-OOK: observando el espectro de un solo canal en la Fig. 6 y la Fig. 7, se puede ver con detalle el efecto de la XPM en NRZ-OOK. El espectro muestra el canal que pasó por 0 CD de la fibra y en el canal que pasó por 30 CD de la misma. En las Fig. 6 y 7 se puede ver que hay una muy pequeña diferencia entre estos dos espectros, causada por la XPM.

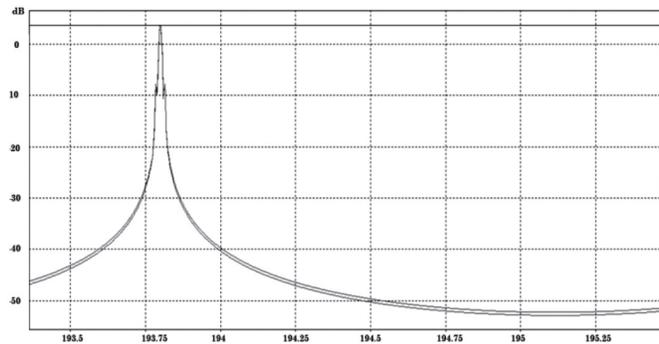


Fig. 6. Señal NRZ-OOK demultiplexada, antes de entrar al receptor.

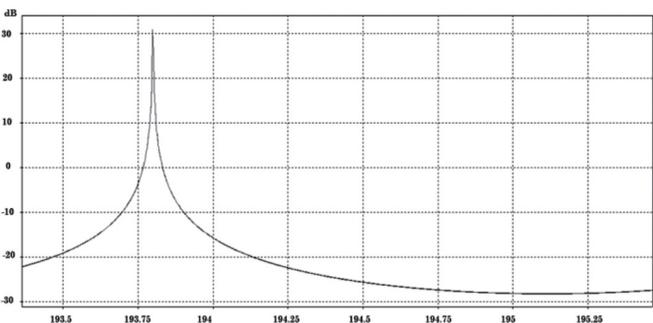


Fig. 7. Señal demultiplexada después de pasar por el receptor coherente.

• Para NRZ-DPSK: Para observar los efectos de la XPM sobre el sistema NRZ-DPSK, y teniendo en cuenta lo que se hizo con la modulación NRZ-OOK, se realizaron simulaciones con un enlace de 16 canales NRZ-DPSK a los cuales se les intercalaron potencias de 0dBm, a -10dBm y se varió la dispersión de 0 CD a 30 CD obteniendo los resultados que se aprecian en la Fig.8 y la Fig. 9.

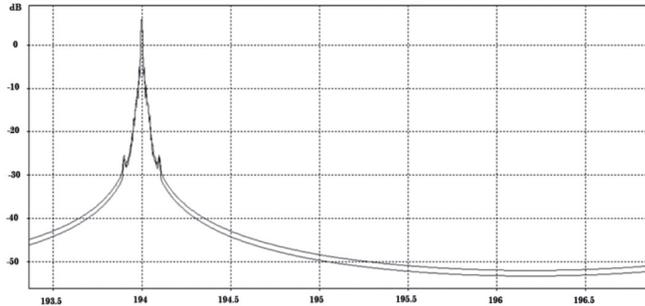


Fig. 8. Señal demultiplexada NRZ-DPSK, antes de entrar al receptor coherente.

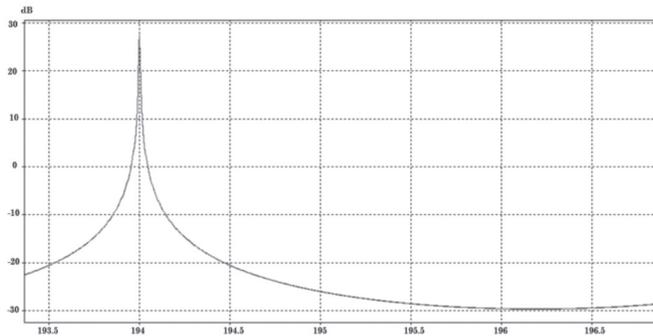


Fig. 9. Señal demultiplexada NRZ-DPSK, después de pasar por el receptor coherente.

Observando el espectro de un solo canal en la Fig. 8 y en la Fig. 9, se puede ver con detalle el efecto de la XPM en NRZ-DPSK. El espectro muestra el canal que pasó por 0 CD de la fibra y el canal que pasó por 30 CD de la fibra. Se puede ver que hay una muy pequeña diferencia entre estos dos espectros causada por la XPM. A pesar de las diferencias en el espectro, que no permiten ver claramente si la XPM está induciendo ruido sobre la señal, el diagrama del ojo muestra el deterioro de la señal con el aumento de la dispersión cromática, lo cual combinado con el deterioro de la señal cuando se aumentan los canales, lleva a concluir que la XPM si induce ruido de fase.

Para el análisis de la SPM se varió la potencia de los amplificadores EDFA y la dispersión cromática, ya que estos son los principales factores que llevan a que éste efecto no lineal induzca ruido de fase. Primero se tomaron 16 canales tanto para el enlace NRZ-OOK, como para NRZ-DPSK, con un span de 80Km. Debido a que con este enlace se obtuvieron resultados aceptables, la misma configuración se realizó para NRZ-DPSK. Fig. 10 y Fig. 11.

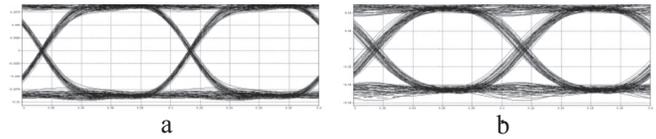


Fig. 10. Sistema de 16 canales NRZ-OOK de un span de 80 km con ganancia de amplificador EDFA de: a) 0dB y b) 10dB.

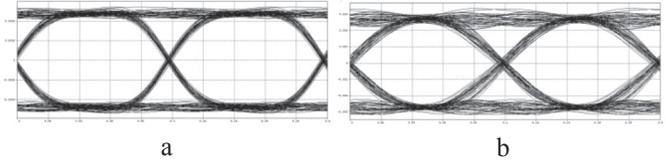


Fig. 11. Sistema de 16 canales NRZ-DPSK de un span de 80 km con ganancia de amplificador EDFA de: a) 0dB y b) 20dB.

En las figuras 10 y 11. Se puede ver que el aumento de la potencia de los EDFA, lo que demuestra claramente que la SPM induce ruido de fase sobre el sistema.

IV. PROPUESTA PARA MITIGAR EL EFECTO DEL RUIDO EN REDES WDM UTILIZANDO DETECCIÓN COHERENTE CON RECEPTORES ÓPTICOS HETERODINOS.

Después de obtener los resultados que muestran los efectos del ruido en redes WDM con detección coherente, fue necesario hacer modificaciones pertinentes de un conjunto de parámetros que permitieron mitigar el ruido y que se relacionan a continuación:

1. Ya que no se logró obtener que los parámetros de desempeño alcanzaran valores dentro de los establecidos en las recomendaciones de la ITU-T cuando se implementan 32 canales, se redujo el número de canales a 4, 8 y 16. La presencia de ruido de fase inducido por la XPM pone límites en la implementación de canales, razón por la cual se trabajó con un máximo de 16.
2. En un principio se definió la longitud del enlace en 500 Km, esto llevó a que la señal tuviera una fuerte sensibilidad a la dispersión y la atenuación, y como es muy difícil lograr en la práctica una compensación del 100% de la dispersión, fue necesario recortar las longitudes de los span, para que con el mismo número de amplificadores se tuviera una longitud de enlace más corta del orden de los 350 km. De esta forma se planteó un límite en la longitud del enlace sobre el cual haya un buen desempeño de la señal.
3. En un inicio los enlaces tenían una compensación de la dispersión 70%, con los cuales no se obtuvieron resultados que cumplieran con los valores mínimos de desempeño, por lo cual se parte del supuesto de mejorar la compensación de la dispersión y se modificó la compensación de la dispersión a 80%. En este sentido se tuvo en cuenta el caso ideal de la compensación del 100% para observar el efecto de los cambios de los demás parámetros.

4. Anteriormente se utilizaron amplificadores EDFA de ganancia al 100%. Buscando obtener mejor desempeño en el sistema combatiendo la atenuación y el ruido, se cambiaron por amplificadores de potencia a 3 dB, el cual contrarresta los ruidos inducidos por la modulación externa, y genera una adecuada ganancia, lo que ayudó al sistema a mejorar su rendimiento. Además, su amplificación en potencia ayuda a contrarrestar los efectos de los ruidos inducidos por XPM y SPM.

A pesar de las modificaciones realizadas a la red, la dispersión cromática siguió siendo el factor que mayores efectos produce sobre el desempeño del sistema; sin embargo, se lograron obtener algunas configuraciones en las que el sistema presenta valores aceptables en sus parámetros de rendimiento. En la Fig. 12 se puede observar que el deterioro de la señal no es tan elevado como se vio en el anteriormente, aunque la diferencia entre la señal compensada en 80% y la de 100% es considerable.

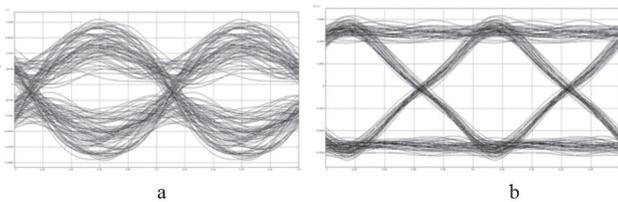


Fig. 12. Sistema NRZ-OOK con 4 canales, 6 span de 60 Km y: a) Compensación del 80% de la CD. b) Compensación del 100% de la CD.

Con respecto a la reducción de la longitud del enlace, se puede ver en la Fig. 13, con un enlace de 4 canales con una compensación del 100% de la CD, que se muestran mejoras con respecto al ruido de amplificación.

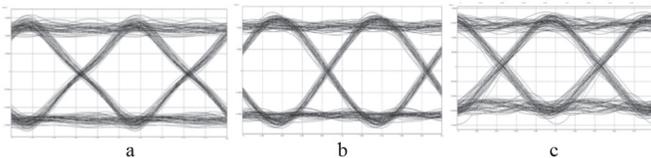


Fig. 13. Sistema NRZ-OOK con 4 canales y: a) 6 span de 60km. b) 5 span de 70km. c) 4 span de 80Km.

Los resultados evidencian que el mejor desempeño se logra con una longitud de span de 70Km. Cuando se reduce la distancia el desempeño baja un poco, debido a la influencia que genera el ruido de amplificación, y si se aumenta la longitud del span por encima de 70 también aumenta la BER, debido al ruido de fase que induce la SPM que aumenta con la distancia. Este mismo comportamiento se pudo apreciar para 8 y 16 canales. También se puede notar que si se amplía la longitud del span utilizando cada vez menos amplificadores sin modificar la longitud del enlace, se deteriora la señal paulatinamente. Sin embargo, se logró un óptimo desempeño en todos los casos, aun cuando se implementan 16 canales con 4 span, que es el caso más crítico, donde se alcanza una BER del orden de 10^{-13} .

Por otra parte, para este caso con modulación NRZ-OOK se suprimió el enlace con 32 canales y se construyeron

enlaces de 4, 8 y 16 canales. Se pudo ver que el deterioro de la señal aumenta cuando hay un incremento de los canales, lo cual muestra que la XPM sigue induciendo ruido de fase no lineal, pero en niveles ahora más controlados, y obteniendo en el peor de los casos una BER de 10^{-13} . En este grupo de resultados, se obtuvo uno inesperado, en el sentido de que en el enlace con 6 span, el sistema tuvo mejor desempeño con 16 canales que con 8, aunque la diferencia no es muy grande. Esto lleva a concluir que la dispersión baja lo suficiente como para disminuir el efecto *Walk-Off*, y con esto aumentar la XPM, lo cual se contrarresta cuando se aumentan los canales a 16.

Finalmente, en el sistema NRZ-DPSK la dispersión cromática siguió siendo el factor más importante en la generación de ruido sobre la señal, como se puede observar en la Fig. 14, donde los unos y ceros se encuentran totalmente desfasados y no se puede obtener una figura de ojo consistente cuando se compensa el 80% de la Dispersión Cromática.

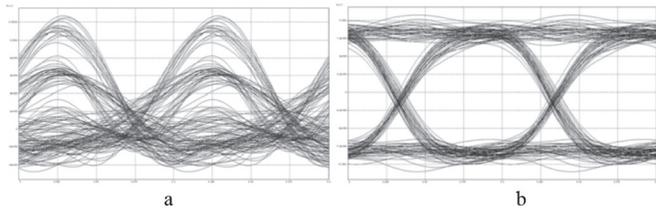


Fig. 14. Sistema NRZ-DPSK con 16 canales, 5 span y: a) Compensación del 80% de la CD. b) Compensación del 100% de la CD.

A pesar de esto se obtuvieron, bajo ciertas condiciones, valores aceptables de la BER compensando el 80% de la dispersión. Solamente se logró para dos casos: 4 canales con 6 span y 8 canales con 6 span. Esto demostró que los sistemas con modulación de fase son mucho más sensibles a la dispersión cromática que los sistemas con modulación de amplitud, al tiempo que requieren más amplificadores y una longitud del span más corta para contrarrestar los ruidos inducidos por la dispersión. Por otra parte, con un enlace de 4 canales con una compensación del 100% de la CD, se muestran mejoras con respecto al ruido de amplificación, Fig. 15. Cuando se varió el número de span con modulación NRZ-OOK con 4 canales, se pudo ver que con modulación NRZ-DPSK los cambios son mínimos, pero aún se puede notar un mejor factor Q en enlace de 5 span de 70 km

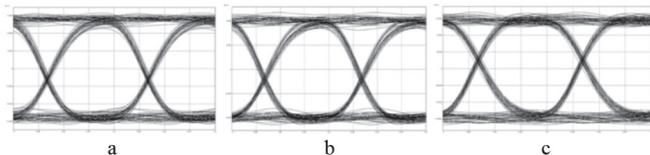


Fig. 15 Sistema NRZ-DPSK con 4 canales y: a) 6 span de 60 km. b) 5 span de 70km. c) 4 span de 80Km.

Después de compensar la dispersión cromática, se pudo observar que el desempeño del sistema NRZ-DPSK es mucho mejor que el del sistema NRZ-OOK, ya que la BER más alta alcanzó el orden de 10^{-21} , lo cual está muy lejos

del máximo estipulado para este parámetro. En éste sistema en fase también se obtuvieron los mejores valores para los parámetros de desempeño cuando se usaron span de 70 Km. Igualmente, la OSNR aumento después de pasar por el detector, lo cual muestra que el sistema NRZ-DPSK es menos sensible a ruidos en el receptor, y la amplificación generada por el receptor coherente compensa la potencia de ruido de la señal recibida.

Así mismo, siguió existiendo ruido de fase en varias señales, producto del aumento de la longitud del span, sin embargo, no afectó lo suficiente como para llevar los parámetros de desempeño a no cumplir con los valores de referencia

V. CONCLUSIONES

Sobre el efecto del ruido en recepción, para redes WDM cuando se utilizan receptores ópticos coherentes heterodinos, los resultados muestran que cuando actúan varios ruidos al mismo tiempo existe un dominio de ciertos tipos de ruido y efectos de la fibra, sobre otros que en la teoría analizada parecían tener mucha importancia. Se puede concluir que dominan el Retardo de Velocidad de Grupo inducido por la dispersión cromática y los ruidos de fase no lineal inducidos por la SPM y la XPM. Los demás ruidos como el ruido de amplificación, el ruido de fase del láser son irrelevantes para los sistemas de detección coherentes con receptores heterodinos balanceados. Además de esto, se demuestra la relación entre la presencia de la dispersión cromática y la presencia de ruido inducido por efectos no lineales, haciendo evidente que para trabajar en la mitigación de estos ruidos hay que buscar un balance de la presencia de estos efectos.

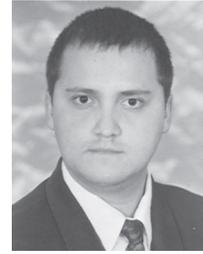
AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a la Universidad del Cauca, en especial al Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones – GNTT de la Universidad del Cauca por su invaluable cooperación en el desarrollo de la investigación, fruto de la cual se generó el presente artículo.

REFERENCIAS

- [1] J. Barry y E. Lee. "Performance of Coherent Optical Receivers" *Proceedings of the IEEE*, Volumen 78, No. 8. 1990.
- [2] K. Kikuchi, "Coherent Optical Communication Systems" Department of frontier informatics, University of Tokio, Kashiwa, Chiba, Japón. 2008.
- [3] K. Po Ho "Phase-Modulated Optical Communication Systems" Springer; 1st Edition. 2005.
- [4] G. Agrawal. "Fiber Optic Communications Systems". The Institute of Optics University of Rochester. 2002.
- [5] G. Gómez y J. F. Grijalba. "Análisis de Desempeño de Formatos de Modulación en Comunicaciones Ópticas sobre Redes WDM" Trabajo de Grado. Universidad del Cauca. 2010.
- [6] UIT-T Recomendación G.694.1 "Spectral Grids for WDM Applications: DWDM Frequency Grid". 2002.
- [7] UIT-T Recomendación G.502. "Characteristics of a Single-mode Optical Fibre Cable" 2001.
- [8] UIT-T Recomendación G.695 "Optical Interfaces for Coarse Wavelength Division Multiplexing Applications". 2002.

- [9] B. Chomycz. "Planning Fiber Optics Networks" McGraw-Hill. 2009.
- [10] G. Charlet. "Coherent Detection Associated with Digital Signal Processing for Fiber Optics Communication" Alcatel-Lucent, Bell-Labs France, Centre de Villarsceaux, Route de Villejust. 2008
- [11] A. Dinamarca. "Análisis del Diagrama del Ojo" Reporte Técnico, Universidad Técnica Federico Santamaría. 2002.



Alejandro Toledo Tovar nació en Florencia, Colombia, el 22 de mayo de 1975. Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, 2000; Especialista en Redes y Servicios Telemáticos, 2002 y Magister en Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, 2014 de la Universidad del Cauca. Docente Titular de Tiempo Completo de la Universidad del Cauca adscrito al Departamento de Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca - Colombia, desde el Año 2000; investigador del Grupo de I+D en Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones (GNTT) adscrito a la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad del Cauca. Áreas de Interés: Calidad de Servicio en Redes IP, Gestión Integrada de Redes y Servicios de Telecomunicaciones y Comunicaciones ópticas.



José Giovanni López Perafán nació en Popayán, Colombia, el 21 de enero de 1967. Ingeniero en Electrónica Universidad del Cauca, 1991; Magister en Telemática Universidad del Cauca, 2003 y Candidato a Doctor en Ciencias de la Electrónica de la Universidad del Cauca. Co-Fundador del Grupo GNTT. Integrante del Technical Programme Committee de la ITU-Kaleidoscope. Docente Titular de Tiempo Completo de la Universidad del Cauca adscrito al Departamento de Telecomunicaciones desde 1992; investigador del Grupo de I+D en Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones (GNTT) adscrito a la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad del Cauca. Áreas de interés: Comunicación de Datos y Sistemas de Redes de Computadores (Protocolos de Comunicación). Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones, Telecomunicaciones Ópticas, Redes de Nueva Generación.



Guefry Leider Agredo Méndez (M'2003) nació en Popayán, Colombia, el 30 de Octubre de 1975. Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, 1998; Especialista en Redes y Servicios Telemáticos, 1999; Magister en Ingeniería - Área: Electrónica y Telecomunicaciones, 2008 y Estudiante de Doctorado en Ciencias de la Electrónica de la Universidad del Cauca. Docente Titular de Tiempo Completo de la Universidad del Cauca adscrito al Departamento de Telecomunicaciones desde 1998; investigador del Grupo de I+D en Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones (GNTT) adscrito a la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad del Cauca. Ha participado en Proyectos de Investigación financiados por COLCIENCIAS, COMUNIDAD EUROPEA y FRIDA-LACNIC. Par Evaluador COLCIENCIAS en TIC. Profesor Consejero de la Rama IEEE de la FIET-UNICAUCA. Áreas de Interés: Comunicaciones y Redes Inalámbricas, Calidad de Servicio, Servicios de Internet, Seguridad en Redes, Voz y Multimedia sobre IP.